

文章编号:1004-7220(2013)01-0097-06

利用非接触测量技术研究颈椎活动度

侯义荣¹, 李凯^{2,3}, 东人⁴, 张东升^{2,3}

(1.上海市应用数学和力学研究所,上海 200072; 2.上海大学力学系,上海 200444;
3.上海市力学在能源工程中的应用重点实验室,上海 200072; 4.第二军医大学附属长征医院 骨科,上海 200003)

摘要: **目的** 颈椎的转动范围较大,传统的数字图像相关(digital image correlation, DIC)算法不能准确测量颈椎的活动度。提出一种改进的 DIC 算法,可以实现大转角的变形测量。**方法** 采用一种子区窗口旋转的相关匹配法,通过引入子窗口的旋转角作为一个新的迭代量,和传统的位置参数(x, y)一起进行 Newton-Raphson 迭代运算。在初始时只需提供位置和角度的迭代初值,即可求出精确的位移和角度值,同时通过平动和转动实验验证该方法的精度和可靠性。**结果** 平动实验证实,本文方法与传统的 DIC 具有相同的效果,位移测量精度在 0.5% 以内;转动实验证实,本文方法可以测量任意转角的变形,角度误差与旋转量无关,角度误差在 0.5° 以内。将该方法用于颈椎的压缩实验,准确地测量了颈椎在压缩过程中的活动度。**结论** 对比传统的 DIC,子区窗口旋转的相关匹配法实现了颈椎在各种载荷作用下大范围活动度的测量,为颈椎的生理稳定和生理活动的测量判断提供了有效的方法。

关键词: 数字图像相关; 颈椎; 活动度; 变形

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Evaluating range of motion in cervical spine by the non-contact measurement technology

HOU Yi-rong¹, LI Kai^{2,3}, DONG Ren⁴, ZHANG Dong-sheng^{2,3} (1. *Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200072, China*; 2. *Department of Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200444, China*; 3. *Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai 200072, China*; 4. *Department of Orthopaedics, Changzheng Hospital, the Second Military Medical University, Shanghai 200003, China*)

Abstract: **Objective** To develop an improved DIC (digital image correlation) algorithm suitable for measuring large ROM (range of motion) of the cervical spine, as traditional DIC algorithm is not capable of accurately measuring ROM of the cervical spine due to its large rotation angles. **Methods** An algorithm which allowed rotation of the subset window was proposed to achieve robust correlation matching in the measurement. A new iterative variable, which represented the orientation of the subset, was introduced and incorporated in the Newton-Raphson iteration method together with the position variables (x, y). By assigning an initial guess to these variables individually, the precise location and rotation angle could be determined in the deformed image. The precision of the proposed method was evaluated by translation and rotation experiments. **Results** The translation experiment confirmed that the proposed method had the same accuracy as the traditional DIC, and the displacement measurement accuracy was within 0.5%. While the rotation experiment indicated that the proposed method could measure the deformation at any angles with precision less than 0.5°. The method was then applied to the measurement of ROM of cervical spine subjected to compressive loads and received good results. **Conclusions**

收稿日期:2012-05-21; 修回日期:2012-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11172161),上海市科委基金项目(11195820900),上海市教委基金项目(12ZZ092),上海市重点学科建设项目(S30106)。

通信作者:张东升,教授,博士研究生导师,Tel:(021)66135258;E-mail:donzhang@staff.shu.edu.cn。

Compared with the traditional DIC algorithm, the proposed method can achieve accurate measurement with large ROM for cervical spine tests with different loads, and provide an effective means for assessing the stability and physiological activities of cervical spine.

Key words: Digital image correlation (DIC); Cervical spine; Range of motion (ROM); Deformation

颈椎活动受限是颈部疾病和颈椎病患者常见的症状,颈椎活动度的正确测量将有助于颈椎基本功能的评价。根据颈椎的解剖特点,颈椎是全身所有关节中活动度最难准确测量的部位^[1]。如何准确测量颈椎活动度仍然是基础和临床研究中很棘手的问题。颈椎活动度的测量分为接触测量和非接触测量,接触测量通常适用于一个节段某一方向上的运动测量。对于多节段测量,非接触测量更为合适。常用的非接触测量有平面测量^[2-3]、立体光学测量^[4]、光电测量^[5-6]、激光测量^[7-8]、数字图像相关法(digital image correlation, DIC)测量^[9]等。由于DIC具有非接触、高精度、全场测量、实验设备简单等优点,该方法已经成为生物力学测量中的有效手段^[9-11]。根据颈椎解剖结构的特异性,其活动往往可能产生较大的转动或者包含转动的大变形,传统的DIC由于未考虑转动的影响,在较大转动时会引起退相关,造成较大的测量误差。有研究表明,转动角 $>7^\circ$ 时,就不能得到正确的搜索^[12-13]。由于颈椎活动度较大, $c1 \sim 7$ 往往产生较大的转角,改进传统的DIC算法,利用DIC方法准确测量颈椎等具有大转角活动度的生理结构具有重要意义。

考虑旋转的DIC算法一直是光测力学的重要问题。王静等^[13]提出利用圆形图像子区和图像灰度不变矩特性相结合的方法,但是由于高阶灰度不变矩对图像噪声较为敏感,实际的计算结果并不令人满意。潘兵等^[14]提出基于差分进化的数字图像相关法,但是由于差分进化需要花费大量的时间,很难将基于差分进化的数字图像相关法引入实际应用。Sun等^[15]提出一种同时使用全局坐标和局部坐标表示形函数的方法,但是全局坐标下的形函数计算将会耗费大量的机时。Zhang等^[16]提出环形模板结合四边形单元的数字图像相关法,但是该方法的计算精度跟测试对象表面的散斑质量关系密切,并且多适用于刚体转动或小变形测量。

本文提出一种基于子区窗口旋转的相关匹配法。其基本思路是在被测试件表面出现任意变形

(包括平移、转动和变形)时,通过基于子区窗口旋转的相关匹配法准确搜索到变形后图像子区的 u 、 v 和 θ ,并作为Newton-Rapshon(N-R)方法^[17-19]的迭代初值进一步精确计算位移、应变信息。本文阐述了基于子区窗口旋转的相关匹配法的基本原理以及实现方法,并通过平动以及转动实验验证该算法的正确性,评价其测量精度;在颈椎压缩实验中,采用本文提出的方法对加载过程中的颈椎图片进行分析,求得颈椎椎体的位移变化情况,从而测出其活动度。

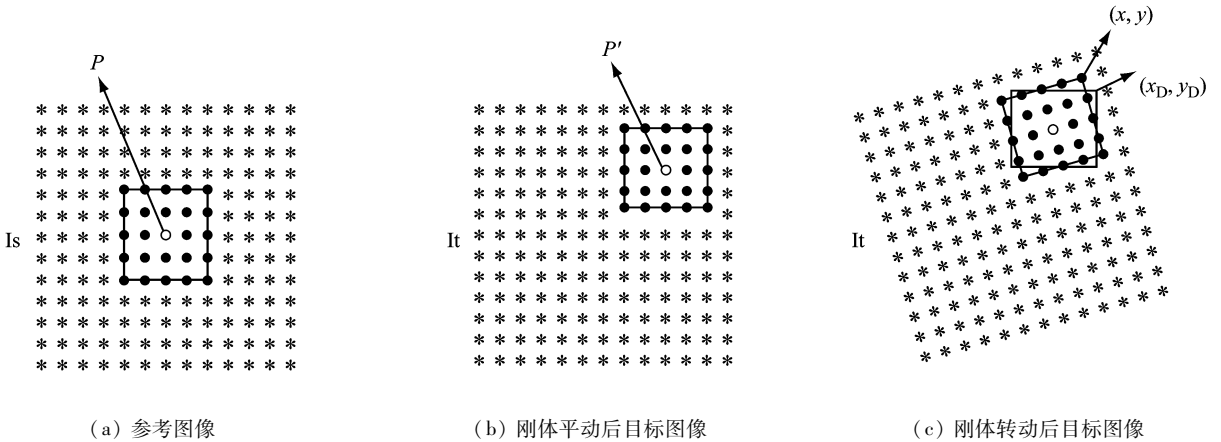
1 基于子区窗口旋转匹配的基本原理

1.1 子区窗口旋转

数字图像相关法是采用图像识别算法分析和匹配变形前后物体表面特征点的位置,通过比较特征点在变形前后的位置获得其位移和应变。如图1所示,若要匹配参考图像 I_s 中点 P 在目标图像 I_t 中的位置,需设定一个相关计算窗口,计算变形前后图像子区的相关系数,相关系数的极值点就是点 P 在目标图像 I_t 上的最佳匹配点 P' 。

在图1中,当物体只有平动和少量变形时,全场相关系数分布中具有唯一、尖锐的相关峰,子区窗口的区域相关性很好,传统的相关搜索可以获得可靠的结果。但是当物体变形产生的转动达到一定角度时,从图1(c)中可以直观地看到,原始子区域的部分像素移出了子区域,使得子区域的相关性显著下降。随着物体转动的角度增大,这种情况会更加明显。显然,在进行相关搜索时,若知道图像转动的角度,计算时按照这个角度对子区域进行旋转,可以保证原始子区域中的像素全部包含于计算子区域中,相关性将显著提高。

按照这样的思路,可以在原始图像先选取两个特征点,并在变形后图像大致选取这两个特征点的对应位置,大致确定图像的转动角度,作为角度迭代的初值。变形后的子区域进行旋转后,可采用常规相关算法确定变形后特征点对之间的位置,再分别以这两个特征点位置为中心,微调子区域旋转量,根



(a) 参考图像

(b) 刚体平移后目标图像

(c) 刚体转动后目标图像

图1 刚体位移前后的图像子区示意图

Fig.1 Schematic of the image before and after rigid body motion (a) Reference image, (b) Target image after translation, (c) Target image after rotation

据相关系数确定子区域的旋转量,反复迭代,最终确定旋转后两个特征点的精确位置。在确定了这两个特征点在变形后图像上的精确位置和精确旋转量后,再利用传统的遗传算法^[20-21]确定相邻点乃至全场的变形信息。

2 实验验证

分别进行了平移和转动实验,验证该方法的有效性。在实验中采用由逐行扫描相机(型号:JAI CV-A1,日本)和图像卡(型号:PC2-Vision,加拿大)组成的图像采集系统采集实验图片。

2.1 水平平移

在移动平台上竖直放置一块表面喷有散斑的平板。在水平方向移动给定的位移,利用图像采集系统依次采集水平位移量 1.4、2.8、4.2、5.6、7.0、8.4、9.8、11.2 mm 8 幅图像进行分析。

相关计算子区域大小为 21×21 像素,相邻两计算点的距离为 10 像素,共计算了计算区域中的 48 个点。结果表明,计算结果与预加的位移相符合。图 2 所示为 48 个点的平均位移值与实际预加位移值的偏差。

由图 2 可见,对于刚体平移,基于子区窗口旋转的相关匹配法与传统 DIC 算法具有相同的效果;并且随着平台平移位移的增加,位移测量值与实际位移值偏差逐渐增大。

2.2 刚体转动

标准转动板表面喷有散斑,四周刻有角度值。

标准转动板逆时针每隔 30° 旋转,同时采集图像,如图 3 所示,共采集 $0^\circ \sim 330^\circ$ 的 12 张图像。表 1 为采用本算法对每幅旋转图像角度的计算值。由表可知,本算法可以很好地确定旋转角;角度测量精度在 0.5° 以内,且精度与图像的旋转角度大小无关。

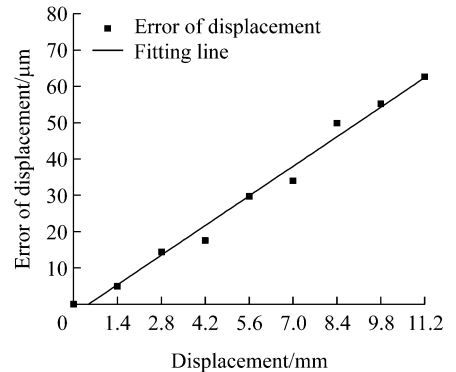
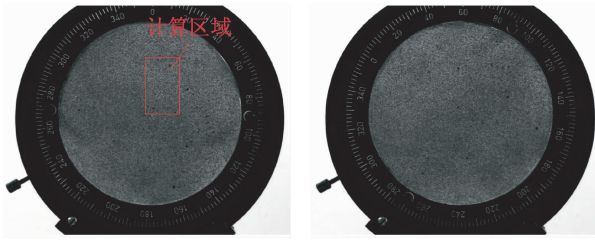


图2 位移计算值与给定值的偏差

Fig.2 Displacement deviation of the measurement

本算法同时可以确定旋转后物面产生的刚体位移。图 3(a)为未旋转时的参考图像,图 3(b)为逆时针旋转 60° 后的变形图像,在参考图像上任意选择一片计算区域。

相关计算图像子区域大小仍然为 21×21 像素,相邻两计算点间的距离为 10 像素,共计算了 1 232 个点。图 4 所示为计算区域第 1 行上 28 个计算点在水平和竖直两个方向的位移值。图 5 所示为所选计算区域的全场位移图,图中全场的位移分量分别用灰度图像的亮度来表示,其中水平位移向右为正,



(a) 参考图像 (b) 逆时针转动 60° 后的图像

图3 平板转动前后的图像

Fig.3 Images of the planar plate before and after rotation (a) Reference image, (b) Image after counterclockwise rotation of 60°

表1 不同旋转角度的计算

Tab.1 Calculation of the different rotation angles

旋转角度/ (°)	测量值	误差	旋转角度/ (°)	测量值	误差
30	30.21	0.21	210	210.37	0.37
60	60.35	0.35	240	240.33	0.33
90	90.28	0.28	270	270.47	0.47
120	120.36	0.36	300	300.34	0.34
150	150.41	0.41	330	329.72	0.28
180	179.89	0.11			

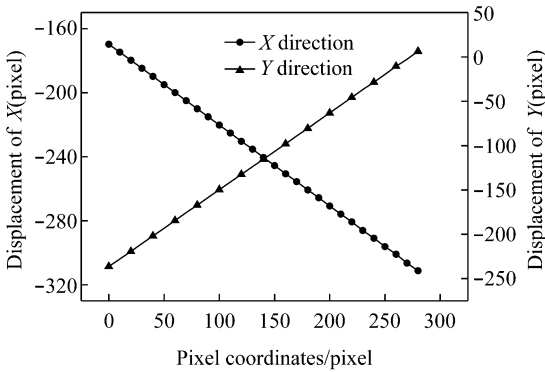


图4 水平直线上的位移分布图

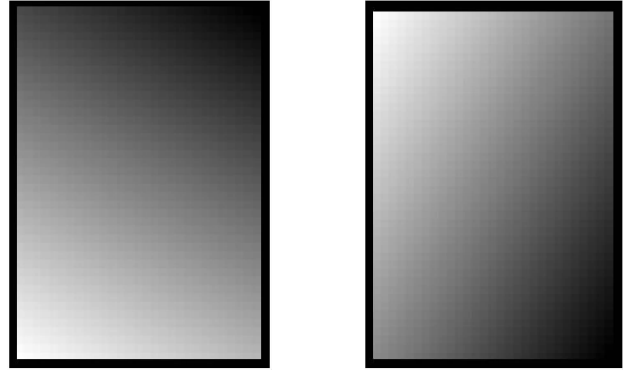
Fig.4 Displacement distributions along the horizontal line

竖直位移向上为正。计算结果与预期相符合。对其他角度图像进行计算,同样得出很好的结果,这充分显示了该算法的可靠性。

3 测试颈椎活动度

颈椎标本由第二军医大学提供,对 c2 和 c7 进行包埋,并用 Zwick 材料试验机对颈椎进行前屈加

载。为了测量方便,在每个椎体上安插了刚性标志图钉,加载过程中用数字摄像机记录颈椎各椎体的变形图像(见图6),图像采集频率为 1 Hz,最大加载力矩为 2 N·m。

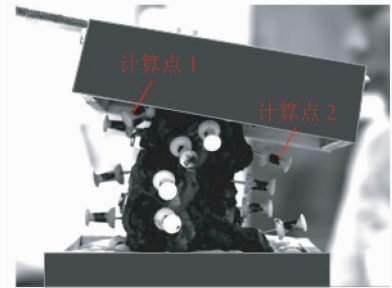


(a) 水平位移 (b) 竖直位移

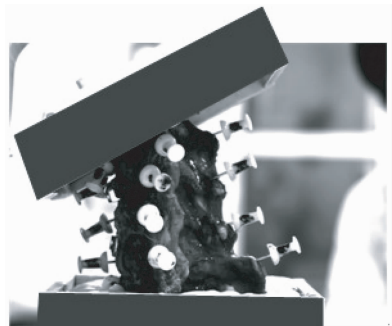
图5 用灰度表示的全场位移分布

Fig.5 Full-field displacement distributions presented with grayscales (a) Horizontal displacement, (b) Vertical displacement

图6 为加载前和加载过程中某时刻的两张图



(a) 变形前颈椎



(b) 变形后颈椎

图6 颈椎压缩前后的图像

Fig.6 Cervical spine images (a) Before compression, (b) After compression

像,这两张图像上端包埋处之间的转角约为 40° 。选取 c3 上的两点(见图 6(a))作为计算点,由于转角太大,传统的 DIC 算法容易产生误相关,不能获得正确的结果。采用子区窗口旋转的相关匹配法,则可以实现对该椎体在水平和垂直两个方向上位移的测量(见图 7)。传统 DIC 算法与子区窗口旋转的相关匹配法测量椎体的转角结果如图 8 所示。

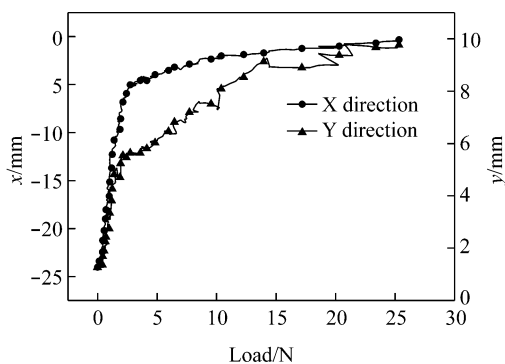


图 7 子区窗口旋转的相关匹配法得出的位移-载荷曲线

Fig. 7 Displacement-load curve calculated by the proposed DIC algorithm

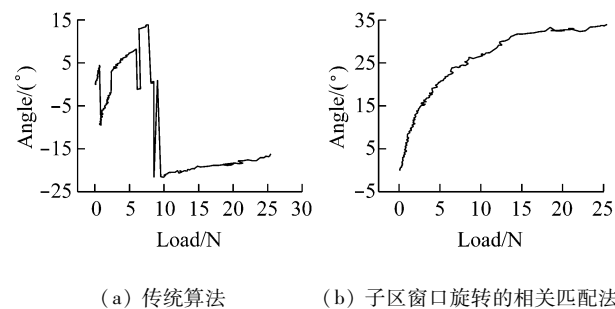


图 8 传统和本文提出的算法得到的颈椎活动度比较

Fig. 8 Comparison of rotation angles resulted from the traditional and proposed methods (a) The traditional algorithm, (b) The proposed algorithm

4 讨论

颈椎作为头颅和躯干的连接部分,兼具支持稳定性和运动性的特点。任何颈椎疾病都有可能影响到颈椎的生理稳定和生理活动,从而影响颈椎正常的生理运动功能。因此,对于颈椎运动功能的测量是颈椎生物力学研究的重要组成部分。特别是非接触测量近年来广泛应用,其具有设备简单易操作且测量精度高的特点,适合对颈椎尸体标本进行中性区、弹性区以及运动范围的测定。本文提出了适合

于生物结构大转角位移非接触的 DIC 算法,它是基于子区域窗口旋转的相关匹配法,通过在变形前后的图像中人为选择两对特征点求得图像之间的大致转动角度,根据求出的角度值将子区域窗口进行旋转,再进行搜索确定 u, v 值,并进一步获得图像之间的旋转角度。亚像素搜索时将子区窗口旋转相关匹配法获得的 u, v, θ 作为 Newton-Rapshon 方法的迭代初值进行迭代,求出精确的位移值和特征点之间的旋转角度,该技术特别适用于颈椎大转角变形的测量。在两个验证性实验中,可以看到基于子区域窗口旋转的相关匹配法的位移精度与传统的相关算法相当。在图 2 中,发现测量误差随着位移的增大而增大,这是由于位移增大后导致相关系数降低,也可能是由于图像标定(图像放大倍数)的误差所致;但从整体效果上看,位移测量精度在 0.5% 以内,角度精度可以达到 0.5° 以内,且与转动角无关。对比传统的 DIC 方法,本方法引入了旋转子区域,搜索初始时人为选择地选取两对特征点,计算出大致角度值并对子区域窗口进行旋转,然后把位移和角度值作为 Newton-Rapshon 的迭代初值,实现自动测量。该算法具有很强的自适应能力,可以根据实际图像的旋转获得高精度的图像匹配精度。

红外/光电技术是人体运动分析和测量的常用技术之一,在被测物体上固定红外线发光二极管,相关设备记录二极管产生的运动信号,即可实现三维测量。但该方法需要购置昂贵的测量仪器,同时由于该设备通常用于大范围的运动测量,其测量精度较低^[5-6]。激光测量是通过摄像头接受激光光束射向脊柱表面的反射光,根据光斑位置、时间间隔、光轴角度,计算脊柱表面的全部数据,其使用的方便性有待进一步提高^[8,22]。DIC 法采用普通成像相机,设备构成简单、经济,可方便地应用在测试现场。通过改进 DIC 算法,引入子区域旋转矩阵,克服了传统 DIC 算法由于转动引起的消相关现象,在被测物体表面出现较大转动时,本文方法仍能进行准确可靠的变形测量。在颈椎活动度测量实验中,该方法实现了对 c3 在大转角运动状态下位移和转角的自动测量,取得了很好的效果。由于引入了转角测量,该方法的计算速度比传统使用 Newton-Rapshon 算法的 DIC 耗费更多机时,后续的研究可以通过进一步改进算法,提高计算效率。

在实际的颈椎前屈实验中发现,该方法对特征点的形态要求不高,这更有利于实际测试的需求。比较图7、8,由于传统的DIC算法仅考虑子区域的平动,在大转角时出现退相关现象,不能正确测量颈椎椎体的实际转动,本文提出的算法很好地实现了颈椎的转角测量,为颈椎的生理稳定和生理活动的测量判断提供了有效的方法。

参考文献:

- [1] Jordan K, Assessment of published reliability studies for cervical spine range-of-motion measurement tools [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 2000, 23(3): 180-195.
- [2] Piché M, Benoit P, Lamber J, *et al*. Development of a computerized intervertebral motion analysis of the cervical spine for clinical application [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 2007, 30(1): 38-43.
- [3] Zuhlke T, Fine J, Haughton VM, *et al*. Accuracy of dynamic computed tomography to calculate rotation occurring at lumbar spinal motion segments [J]. *Spine*, 2009, 34(6): 215-218.
- [4] Panjabi MM, Duranceau JS, Oxland TR, *et al*. Multidirectional instabilities of traumatic cervical spine injuries in a porcine model [J]. *Spine*, 1989, 14(10): 1111-1115.
- [5] Goertzen DJ, Lane C, Oxland TR. Neutral zone and range of motion in the spine are greater with stepwise loading than with a continuous loading protocol. An in vitro porcine investigation [J]. *J Biomech*, 2004, 37(2): 257-261.
- [6] Nassos JT, Ghanayem AJ, Sasso RC, *et al*. Biomechanical evaluation of segmental occipitoatlantoaxial stabilization techniques [J]. *Spine*, 2009, 34(25): 2740-2744.
- [7] Poncet P, Delorme S, Ronsky JL, *et al*. Reconstruction of laser-scanned 3D torso topography and stereoradiographical spine and rib-cage geometry in scoliosis [J]. *Comput Methods Biomech Biomech Biomed Engin*, 2000, 4(1): 59-75.
- [8] Heuer F, Schmidt H, Claes L, *et al*. A new laser scanning technique for imageing intervertebral disc displacement and its application to modeling nucleotomy [J]. *Clin Biomech*, 2008, 23(3): 260-269.
- [9] 夏赣民, 陈金龙, 计欣华. 数字标记点相关法在脊柱生物力学中的应用研究 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2005, 24(5): 554-559.
- [10] 吴佳, 仲琳, 于海洋, 等. 前牙唇面微观纹理的测量技术研究 [J]. *医用生物力学*, 2011, 26(3): 269-273.
- Wu J, Zhong L, Yu HY, *et al*. Study on measuring method for surface micromorphology of human dentin [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(3): 269-273.
- [11] 张东升. 数字图像相关测量技术及其应用 [J]. *医用生物力学*, 2009, 24(2): 85-88.
- Zhang DS. Digital image correlation: Theory and applications [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(2): 85-88.
- [12] Hung PC, Voloshin AS. In-plane strain measurement by digital image correlation [J]. *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 2003, 25(3): 215-221.
- [13] 王静, 李鸿琦, 刘美华, 等. 一种圆形窗口与矩特征相结合的新型高效数字图像相关方法 [J]. *实验力学*, 2004, 19(4): 500-506.
- [14] 潘兵, 谢惠民. 基于差分进化的数字图像相关方法 [J]. *光子学*, 2006, 18(1): 100-103.
- [15] Sun W, Quan CG, Tay CJ, *et al*. Global and local coordinates in digital image correlation [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(7): 1050-1056.
- [16] Zhang X, Chen J, Wang ZT, *et al*. Digital image correlation using ring template and quadrilateral element for large rotation measurement [J]. *Opt Laser Eng*, 2012, 50(7): 922-928.
- [17] Bruck HA, McNeil SR, Sutton MA, *et al*. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correlation [J]. *Exp Mech*, 1987, 29(3): 261-267.
- [18] Pan B, Xie HM, Guo ZQ, *et al*. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation [J]. *Opt Eng*, 46(3): 033601
- [19] 潘兵, 谢惠民, 夏勇, 等. 数字图像相关中基于可靠变形初值估计的大变形测量 [J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 400-406
- Pan Bing, Xie Huimin, Xia Yong, Wang Qiang. Large-deformation measurement based on reliable initial guess in digital image correlation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 400-406.
- [20] Ma SP, Jin GC. Digital speckle correlation method improved by genetic algorithm [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2003, 16(4): 366-373.
- [21] Pilch A, Mahajan A, Chu T. Measurement of whole-field surface displacements and strain using a genetic algorithm based intelligent image correlation method [J]. *J Dyn Syst Meas Contr*, 2004, 126(3): 479-488.
- [22] 季伟, 王向阳. 人体脊柱运动测量方法研究进展 [J]. *医用生物力学*, 2011, 26(1): 92-96.
- Ji W, Wang XY. Advances in measuring methods for human spinal movement [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(1): 92-96.